

BADANIA ZMĘCZENIOWE W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

LECH DIETRICH, KAROL TURSKI (WARSZAWA)

1. Wstęp

Podstawowe badania zmęczeniowe można podzielić na dwie zasadnicze grupy. Pierwszą z nich tworzą badania zajmujące się istotą zjawisk zmęczeniowych. Jest to bardzo obszerna grupa prac na temat powstawania i rozprzestrzeniania się pęknięć podczas obciążeń zmiennych. Do drugiej grupy należą badania traktujące zagadnienia zmęczenia z fenomenologicznego punktu widzenia. Do grupy tej należą badania doświadczalne prowadzone w celu weryfikacji kryteriów zniszczenia zmęczeniowego w złożonym stanie naprężenia, którym poświęcona jest niniejsza praca przeglądowa.

W części prac wyniki doświadczeń przedstawione są w przestrzeni naprężeń w postaci powierzchni zniszczenia zmęczeniowego, a ściślej mówiąc przecięcia tej powierzchni płaszczyną $\sigma_3 = 0$, określonej dla stałej ilości cykli [2, 8, 9, 14, 15, 16]. Autorzy innych prac stawiają sobie za cel ustalenie, jakie czynniki i w jakim stopniu wpływają na zniszczenie zmęczeniowe w warunkach zmiennych obciążeń. Do grupy tej zaliczyć można pracę BLASSA i FINDLEYA [1] na temat wpływu naprężenia pośredniego σ_2 (przy $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) na zniszczenie stali o wysokiej wytrzymałości, pracę PARRY'EGO [13], gdzie przedstawiono wpływ trójosiowego równomiernego rozciągania, oraz CROSSLANDA [3], który zajmował się wpływem hydrostatycznego ciśnienia na wytrzymałość zmęczeniową. Do grupy tej należy również praca FINDLEYA i in. [4], którzy starali się zbadać czy energia odkształcenia jest główną przyczyną zniszczenia zmęczeniowego.

Jednym z prostszych sposobów wywołania w próbkę cyklicznego, złożonego stanu naprężenia, jest poddanie jej jednoczesnemu zmiennemu zginaniu i skręcaniu. Metodyka takich badań jest o tyle prosta, że do wywoływania obciążenia mogą być użyte układy mechaniczne. Drugą zaletą tego sposobu obciążania jest możliwość stosowania wysokich częstości jego zmiany, co znacznie skraca czas trwania próby. Ale jednocześnie sposób ten ma istotne wady. Po pierwsze — stan naprężenia w przekroju próbki jest niejednorodny, cechujący się znacznym gradientem zmiany poszczególnych składowych. Po drugie — naprężenia wywołane zginaniem obrotowym mogą zmieniać się tylko według cyklu symetrycznego. Po trzecie — w zależności od stosunku zginania do skręcania zmieniają się główne osie naprężenia, co uniemożliwia stwierdzenie i ewentualne wprowadzenie poprawek uwzględniających anizotropowe własności materiału. Czynniki te powodują, że ten sposób wywoływania cyklicznego, złożonego stanu naprężenia lepiej nadaje się do doświadczalnych badań konstrukcji, niż dla określania własności materiałów.

Lepszym, z teoretycznego punktu widzenia, sposobem doświadczalnego wyznaczenia powierzchni zniszczenia zmęczeniowego jest metoda analogiczna do stosowanej przy określaniu powierzchni plastyczności. Metodyka doświadczeń jest jednak całkowicie odmienna. Zasadniczą przyczyną komplikacji są oczywiście zmienne obciążenia i długo-trwałość badania jednej próbki, co powoduje konieczność zastosowania automatycznej kontroli i regulacji obciążenia, jak również zwrócenia szczególnej uwagi na uszczelnienia (o ile obciążenie jest wywoływane za pośrednictwem cieczy). Poza tym należy pamiętać, że dla wyznaczenia jednego punktu na płaszczyźnie naprężeń głównych trzeba zbadać co najmniej kilka próbek przy różnych poziomach naprężeń w celu otrzymania części krzywej Wöhlera w interesującym nas zakresie. Badania przy obciążeniach zmiennych wymagają również ogromnej staranności w wykonaniu samej próbki. Wymienione tu czynniki są zapewne głównymi przyczynami stosunkowo niewielkiej ilości prac poświęconych temu zagadnieniu.

Do bezpośredniego wyznaczenia powierzchni zniszczenia zmęczeniowego służyły zazwyczaj cienkościennie próbki rurkowe poddane różnym kombinacjom ciśnienia wewnętrznego i siły osiowej. Natomiast próbki w postaci rur grubościennych czy też próbki kształtowe były wykorzystywane do badania wpływu określonych czynników na zniszczenie zmęczeniowe. Wyjątkiem jest tu praca SAWERTA [16], której celem było określenie powierzchni zniszczenia zmęczeniowego przy wykorzystaniu próbek kształtowych.

Zasadniczym celem niniejszej pracy było omówienie wyników badań doświadczalnych przeprowadzonych w złożonych stanach naprężenia i dotyczących warunków zniszczenia zmęczeniowego. Poza tym omówiono te badania przeprowadzone w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia, które są pomocne przy interpretacji wyników doświadczeń w złożonych stanach.

Omawiane prace uszeregowano według rodzaju i kształtu próbek użytych w doświadczeniach. I tak jako pierwsze omówiono badania wykonane przy użyciu próbek kształtowych, następnie prace dotyczące grubościennych próbek cylindrycznych i wreszcie doświadczenia przeprowadzone na cienkościennych próbkach rurkowych. W każdej z wymienionych grup przyjęto chronologiczną kolejność omawiania poszczególnych artykułów. Podano również i opisano w zwarty sposób równania kryteriów zniszczenia zmęczeniowego, które wymienione były w pracach doświadczalnych.

2. Kryteria zniszczenia zmęczeniowego

Spotykane w literaturze kryteria zniszczenia zmęczeniowego w złożonym stanie naprężenia są oparte na tych samych założeniach i mają analogiczną budowę co kryteria uplastycznienia względnie zniszczenia w złożonym stanie naprężenia wywołanym obciążeniami statycznymi. Zmienia się jedynie w tych warunkach statyczną stałą materiałową przez trwałą, względnie wyznaczoną dla określonej ilości cykli, wytrzymałość zmęczeniową przy jednoosiowym stanie naprężenia.

Kryteria zniszczenia zmęczeniowego można podzielić w zależności od czynnika decydującego o zniszczeniu na cztery grupy [4].

1. Kryteria, w których o zniszczeniu decyduje wielkość naprężeń.
2. Kryteria, w których o zniszczeniu decydują odkształcenia.

3. Kryteria, w których o zniszczeniu decyduje energia odkształcenia.

4. Kryteria empiryczne.

W złożonym stanie naprężenia, warunki te można wyrazić w postaci równań. Amplitudy i średnie wartości naprężeń głównych oznaczono w równaniach odpowiednio przez σ_{a1} , σ_{a2} , σ_{a3} oraz σ_{m1} , σ_{m2} , σ_{m3} .

— Kryterium naprężeń głównych

$$(2.1) \quad \max\{|\sigma_{a1}|, |\sigma_{a2}|, |\sigma_{a3}|\} = \sigma_F.$$

— Kryterium naprężeń ścinających (Treski)

$$(2.2) \quad \sigma_{a1} - \sigma_{a3} = \sigma_F,$$

gdzie $\sigma_{a1} > \sigma_{a2} > \sigma_{a3}$.

— Kryterium odkształceń głównych

$$(2.3) \quad \sigma_{a1} - \mu(\sigma_{a2} + \sigma_{a3}) = \sigma_F,$$

gdzie μ jest współczynnikiem Poissona; amplitudy naprężeń głównych spełniają nierówność $|\sigma_{a1}| > |\sigma_{a2}| > |\sigma_{a3}|$.

— Kryterium całkowitej energii odkształcenia

$$(2.4) \quad \sqrt{\sigma_{a1}^2 + \sigma_{a2}^2 + \sigma_{a3}^2 - 2\mu(\sigma_{a1}\sigma_{a2} + \sigma_{a2}\sigma_{a3} + \sigma_{a3}\sigma_{a1})} = \sigma_F;$$

przez μ oznaczono współczynnik Poissona.

— Kryterium Hubera-Misesa

$$(2.5) \quad \sqrt{\sigma_{a1}^2 + \sigma_{a2}^2 + \sigma_{a3}^2 - (\sigma_{a1}\sigma_{a2} + \sigma_{a2}\sigma_{a3} + \sigma_{a3}\sigma_{a1})} = \sigma_F.$$

Równanie to ma wiele interpretacji fizycznych [7]. Przy badaniach zmęczeniowych nazywano je kryterium energii odkształcenia postaciowego lub oktaedrycznego naprężenia ścinającego.

— Kryterium uwzględniające wpływ pierwszego niezmiennika naprężenia zostało podane przez Coulomba-Mohra dla obciążeń statycznych, natomiast w odniesieniu do wytrzymałości zmęczeniowej nazywa się go również warunkiem Stanfielda (1935, cyt. za [15]). Przyjmując $\sigma_{a1} > \sigma_{a2} > \sigma_{a3}$ możemy ten warunek wyrazić w postaci

$$(2.6) \quad \sigma_{a1} - \sigma_{a3} \left(\frac{\sigma_F}{\tau_F} - 1 \right) = \sigma_F,$$

gdzie jak poprzednio σ_F jest wytrzymałością zmęczeniową przy rozciąganiu, a τ_F przy skręcaniu.

GOUGH i in. (cyt. za [5]) opierając się na wielu doświadczeniach przy złożonym cyklicznym obciążaniu momentem zginającym i skręcającym stwierdzili, że w zależności od materiału zmienia się w dość szerokich granicach stosunek wytrzymałości zmęczeniowej przy zginaniu do wytrzymałości zmęczeniowej przy skręcaniu. Zaproponowali oni dwa warunki. Jeden znany pod nazwą «the ellipse quadrant» (ćwiartka elipsy) opisywał zniszczenie zmęczeniowe miękkiej stali wywołane kombinacją cyklicznego zginania i skręcania.

W płaskim stanie naprężenia warunek ten ma postać

$$\frac{\sigma_a^2}{\sigma_F^2} + \frac{\tau_a^2}{\tau_F^2} = 1,$$

gdzie σ_a i τ_a są odpowiednio naprężeniami wywołanymi zginaniem i skręcaniem, a σ_F i τ_F są stałymi materiałowymi. Wyrażając σ_a i τ_a w funkcji naprężeń głównych [$\sigma_a = \sigma_{a1} + \sigma_{a2}$; $\tau_a = \sqrt{(-\sigma_{a1}\sigma_{a2})}$] otrzymujemy postać

$$(2.7) \quad \sigma_{a1}^2 + \sigma_{a2}^2 - \left[\left(\frac{\sigma_F}{\tau_F} \right)^2 - 2 \right] \sigma_{a1}\sigma_{a2} = \sigma_F^2.$$

Drugi warunek sformułowany przez Gougha zwany «the ellipse arc» (luk elipsy) opisywał zniszczenie zmęczeniowe żeliwa poddanego zmiennym obciążeniami zginającym i skręcającym. W płaskim stanie naprężenia, we współrzędnych σ_a , τ_a kryterium Gougha ma postać

$$\frac{\sigma_a^2}{\sigma_F^2} \left(\frac{\sigma_F}{\tau_F} - 1 \right) + \frac{\sigma_a}{\sigma_F} \left(2 - \frac{\sigma_F}{\tau_F} \right) + \frac{\tau_a^2}{\tau_F^2} = 1,$$

a wyrażone w naprężeniach głównych ma identyczną formę jak warunek Coulomba-Mohra.

W roku 1956 CROSSLAND [3] badał wpływ ciśnienia hydrostatycznego na wytrzymałość zmęczeniową stali przy skręcaniu obustronnym. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń, które będą omówione w dalszej części niniejszej pracy (rys. 4) wskazują, że dla badanego materiału kryterium zniszczenia zmęczeniowego można wyrazić w postaci

$$(2.8) \quad \sqrt{\sigma_{a1}^2 + \sigma_{a2}^2 + \sigma_{a3}^2 - (\sigma_{a1}\sigma_{a2} + \sigma_{a2}\sigma_{a3} + \sigma_{a3}\sigma_{a1})} = \sqrt{3} \tau_F - \left(\sqrt{3} \frac{\tau_F}{\sigma_F} - 1 \right) (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3).$$

W równaniu tym przez σ_{a1} , σ_{a2} , σ_{a3} oznaczono amplitudy naprężeń głównych spowodowanych cyklicznym stanem obciążenia, a przez σ'_1 , σ'_2 , σ'_3 największe wartości naprężeń w kierunkach głównych, będące sumą naprężeń wynikających z ciśnienia hydrostatycznego i naprężeń od obciążeń zmiennych. Przez σ_F oznaczono wytrzymałość zmęczeniową przy symetrycznym cyklu rozciąganie — ściskanie, a τ_F odnosi się do symetrycznego cyklu skręcania.

Inną modyfikację warunku Hubera-Miscsa (2.5) zaproponował MARIN [10]. Celem wprowadzonych przez niego zmian było uwzględnienie średnich naprężeń w cyklu dla złożonego stanu naprężenia o synchronicznie zmiennych składowych. Punktem wyjścia jego rozważań było empiryczne równanie dla jednoosiowych stanów naprężenia uzależniające amplitudę naprężenia od średniej wartości naprężenia w cyklu. Równanie to podane przez Marina w postaci

$$(2.9) \quad \left[\frac{\sigma_a}{\sigma_F} \right]^n + \left[k \frac{\sigma_m}{R_m} \right]^l = 1$$

jest uogólnioną formą spotykanych w literaturze zależności tego typu. W równaniu tym σ_a oznacza amplitudę naprężenia, σ_m — średnie naprężenie w cyklu, σ_F — wytrzymałość zmęczeniową przy symetrycznym cyklu, R_m — doraźną wytrzymałość statyczną, n , l , k — stałe materiałowe. Przyjmując w zależności (2.9) $n = l = 1$, $k = \frac{R_m}{\sigma_{pl}}$ otrzymujemy równanie

Soderberga, gdzie σ_{pl} jest granicą plastyczności danego materiału. Zależność Goodmana otrzymamy dla $n = l = k = 1$. Podstawiając $n = k = 1$, $l = 2$ otrzymujemy parabolę Gerbera, natomiast dla wartości $n = l = 2$, $k = 1$ dostajemy spotykaną w literaturze zależność eliptyczną.

Wprowadzone przez Marina uogólnienie równania (2.9) na złożony stan naprężenia polegało na zastąpieniu jednoosiowych wartości σ_a i σ_m przez ich intensywności określone związkami

$$(\sigma_a)_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a3} - \sigma_{a1})^2},$$

$$(\sigma_m)_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{m1} - \sigma_{m2})^2 + (\sigma_{m2} - \sigma_{m3})^2 + (\sigma_{m3} - \sigma_{m1})^2},$$

gdzie przez $\sigma_{a1}, \sigma_{a2}, \sigma_{a3}$ określono amplitudy poszczególnych składowych głównych naprężenia, a przez $\sigma_{m1}, \sigma_{m2}, \sigma_{m3}$ średnie wartości w cyklu poszczególnych składowych głównych.

Podstawiając powyższe zależności do równania (2.9) otrzymujemy

$$(2.10) \quad \left[\left(\frac{1}{\sigma_F} \right) \sqrt{\sigma_{a1}^2 + \sigma_{a2}^2 + \sigma_{a3}^2 - \sigma_{a1} \sigma_{a2} - \sigma_{a2} \sigma_{a3} - \sigma_{a3} \sigma_{a1}} \right]^n + \left[\left(\frac{k}{R_m} \right) \sqrt{\sigma_{m1}^2 + \sigma_{m2}^2 + \sigma_{m3}^2 - \sigma_{m1} \sigma_{m2} - \sigma_{m2} \sigma_{m3} - \sigma_{m3} \sigma_{m1}} \right]^l = 1.$$

Przyjmując $n = l = 2, k = 1$ dostajemy dla dwuosiowego stanu naprężenia następujący związek

$$(2.11) \quad [\sigma_{a1}^2 - \sigma_{a1} \sigma_{a2} + \sigma_{a2}^2] + \left(\frac{\sigma_F}{R_m} \right)^2 [\sigma_{m1}^2 - \sigma_{m1} \sigma_{m2} + \sigma_{m2}^2] = \sigma_F^2.$$

Dla symetrycznych cykli zmian składowych naprężenia, gdy $\sigma_{m1} = \sigma_{m2} = 0$ warunek Marina określony równaniem (2.11) sprowadza się do elipsy Hubera–Misesa. Zależność ta nie była jednak szerzej stosowana w pracach doświadczalnych traktujących o zniszczeniu zmęczeniowym w złożonym stanie naprężenia. Jedynie w pracy [19] obok innych wymieniono również warunek Marina.

Oprócz wymienionych fenomenologicznych kryteriów zniszczenia zmęczeniowego, spotyka się również w literaturze próby uwzględnienia w kryteriach zmęczeniowych wielkości fizycznych. Przykładem może być kryterium zaproponowane przez YOKOBORI [18], w którym zniszczenie uzależniono między innymi od średnicy ziarna, od średniej odległości między źródłami Franka–Reada i od naprężenia potrzebnego do uruchomienia dyslokacji. Warunek ten zawiera jednak szereg trudnych do określenia współczynników, bez których ocena jego zgodności z danymi doświadczalnymi jest niemożliwa.

3. Badania na próbkach kształtowych

Prace na temat doświadczalnej weryfikacji związków między naprężeniami, przy zniszczeniu zmęczeniowym w złożonym stanie naprężenia, prowadzone były początkowo na próbkach poddanych zginaniu i skręcaniu. Taki sposób obciążania oprócz wymienionych już poprzednio istotnych wad (niejednorodność stanu naprężenia, zmienność kierunku naprężeń głównych dla każdej kombinacji zginania i skręcania) ogranicza również zakres możliwych stanów naprężeń. Na płaszczyźnie naprężeń głównych punkty doświadczalne uzyskane z tak przeprowadzonych prób są zawarte w obszarze ograniczonym z jednej

strony osią σ_1 , która odpowiada stanowi wywołanemu przez zginanie przy zerowym momencie skracającym, a prostą o równaniu $\sigma_1 = -\sigma_2$, która odpowiada stanowi wywołanemu przez skracanie przy zerowym momencie zginającym.

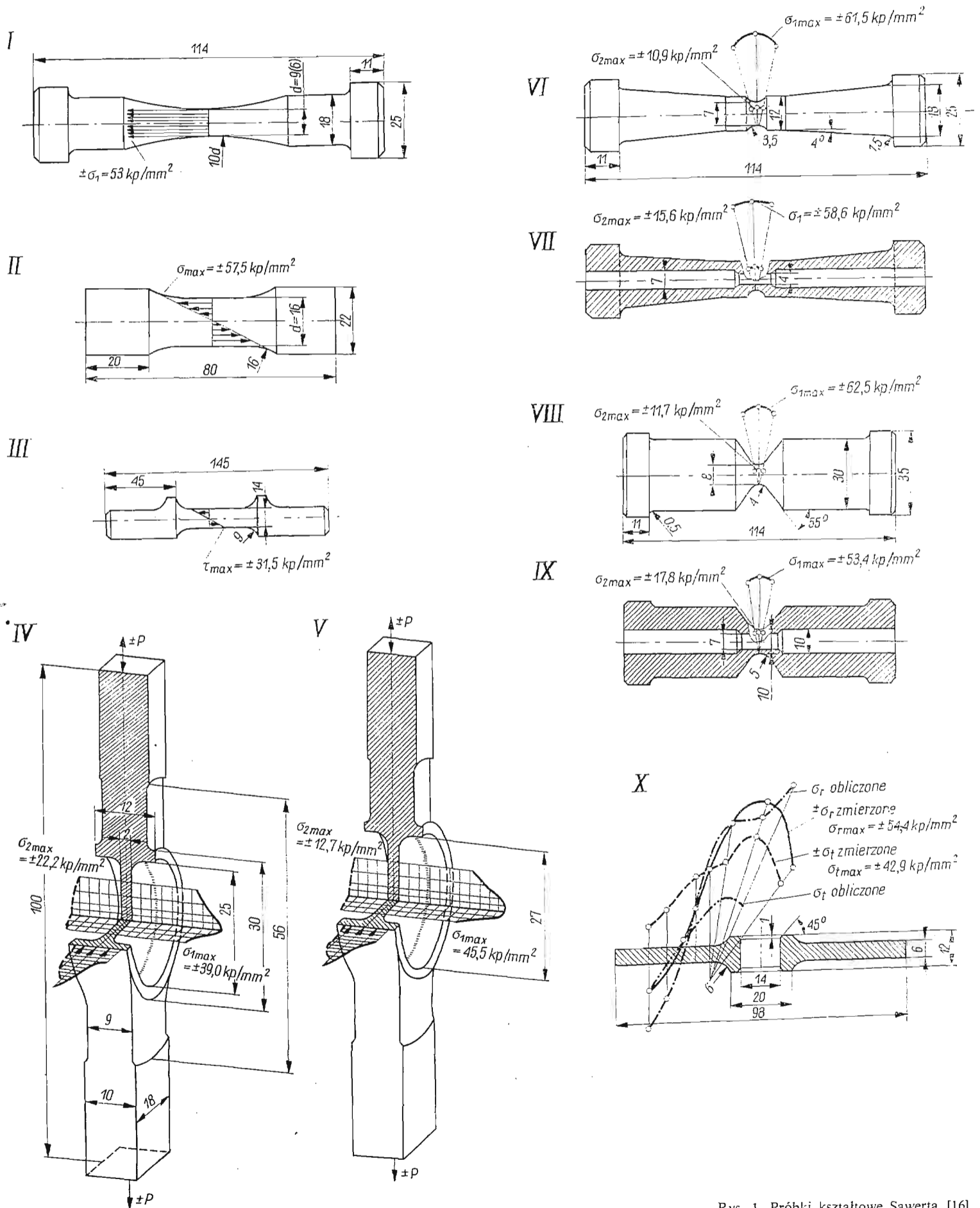
Pewną innowację ze względu na rodzaj próbek wprowadził w 1943 r. SAWERT [16]. Zastosował on próbki o tak dobranym kształcie, że w przekroju pomiarowym powstawał złożony stan naprężenia. Stosując różne kształty próbek (rys. 1) przeprowadził badania przy dziewięciu różnych proporcjach naprężeń głównych. Wszystkie próbki oprócz trzeciej z przedstawionych na rys. 1 obciążano cyklem wahadłowym rozciąganie — ściskanie. Próbka oznaczona numerem III była badana przy symetrycznym skręcaniu. Próbka X o kształcie tarczy kołowej była utwierdzona na obrzeżu i następnie przy pomocy trzpienia zamocowanego w otworze była uginana siłą osiową o symetrycznym cyklu.

Na poszczególnych rysunkach próbek zaznaczono w ich najbardziej osłabionym miejscu zarówno rozkłady naprężeń, jak i ich maksymalne wartości odpowiadające granicy zmęczenia (przy 10^7 cykli zmian obciążenia). Zaznaczone na tym rysunku wartości naprężeń odnoszą się do próbek wykonanych ze stali chromo-wanadowej (o zawartości w %: C — 0,29; Mn — 0,68; Cr — 2,55; Ni — 0,27; V — 0,25). Rozkłady naprężeń obliczono na podstawie określonego doświadczalnie pola odkształceń sprężystych. Dla cylindrycznych próbek z karbami oprócz wartości zmierzonych autor podał również wartości obliczone na podstawie nomogramów Neubera.

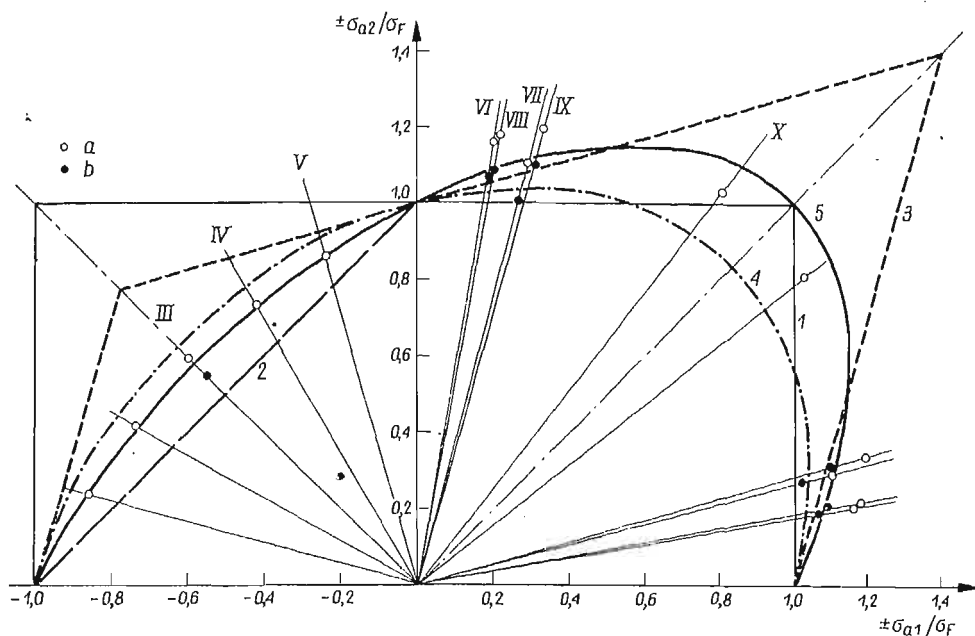
Wyniki doświadczeń zostały przedstawione na płaszczyźnie naprężeń głównych we współrzędnych bezwymiarowych (rys. 2). Punkty doświadczalne otrzymane na jednej próbce odkładano dwukrotnie, symetrycznie względem prostych $\sigma_{a1} = \sigma_{a2}$ i $\sigma_{a1} = -\sigma_{a2}$. Stwarza to złudzenie izotropowych własności materiału, co jednak nie było stwierdzone doświadczalnie. Biorąc pod uwagę niejednorodność stanu naprężenia w przekroju próbki i różny gradient naprężenia dla poszczególnych próbek autor odnosił wyniki doświadczeń zarówno do jednoosiowej próby rozciągania — ściskania (punkty białe) jak i do próby przy zginaniu (punkty czarne). Podkreślono w ten sposób, że nie są to próby równoważne. Identyczne badania przeprowadzono również dla próbek ze stali węglowej (o zawartości węgla 0,14%) oraz dla próbek ze stali chromo-wanadowej azotowanej, o grubości warstwy utwardzonej w granicach 0,35 do 0,40 mm.

Wyniki doświadczeń, przedstawione w ewspółrzędnych bezwymiarowych dla stali węglowej i stopowej, różnią się w nieznacznym stopniu. Na zamieszczonych przez SAWERTA wykresach we współrzędnych $\frac{\sigma_{a1}}{\sigma_F}$ i $\frac{\sigma_{a2}}{\sigma_F}$ (rys. 2) punkty doświadczalne wykazują najlepszą zgodność z krzywą kryterium energii odkształcenia postaciowego (2.5), w stosunku do której największe odchylenie nie przekracza 8%.

Do kategorii prac, w których wykorzystywano próbki kształtowe można również zaliczyć pracę FINDLEYA i in. [4] z 1961 r. Autorzy postawili sobie za cel doświadczalne stwierdzenie, czy przy stałej energii odkształcenia wystąpi zniszczenie zmęczeniowe. W tym celu zaprojektowali urządzenie, w którym próbka o kształcie tarczy o zmiennej grubości i średnicy około 8 cm obracała się względem przyłożonego stałego ściskającego obciążenia promieniowego. W ten sposób zapewnili oni warunek stałej energii odkształcenia w środku tarczy przy zmiennej orientacji naprężeń głównych względem próbki. W tak zaprogramowanym doświadczeniu autorzy nie musieli określać stanu naprężenia w próbce, chodziło



Rys. 1. Próbkki kształtowe Sawerta [16]



Rys. 2. Porównanie kryteriów wytrzymałości zmęczeniowej z wynikami doświadczeń dla stali stopowej przy cyklu symetrycznym [16]. Punkty doświadczalne odniesiono do trwałej wytrzymałości przy: a — cyklu rozciąganie-ściskanie; b — cyklu zginania. 1; 2; 3; 4; 5 — linie teoretyczne według rozdziału 2.

tylko o stwierdzenie, czy wystąpi zniszczenie zmęczeniowe. Doświadczenia przeprowadzono na stopie aluminium 35S-T61 o składzie chemicznym w procentach: Cu — 1,34; Fe — 0,21, Si — 5,09; Mg — 0,44; Ti — 0,14. Wobec faktu wystąpienia pęknięcia tarczy autorzy konkludują, że zniszczenie zmęczeniowe może być wynikiem zmiany pewnych składowych naprężeń czy odkształceń odniesionych do szczególnej płaszczyzny materiału. Dalej autorzy stwierdzają, że chociaż energia odkształcenia może być użyteczna jako formuła przy projektowaniu w złożonym stanie naprężenia to przeprowadzone doświadczenia wskazują, że nie jest ona istotna dla opisu mechanizmu zniszczenia.

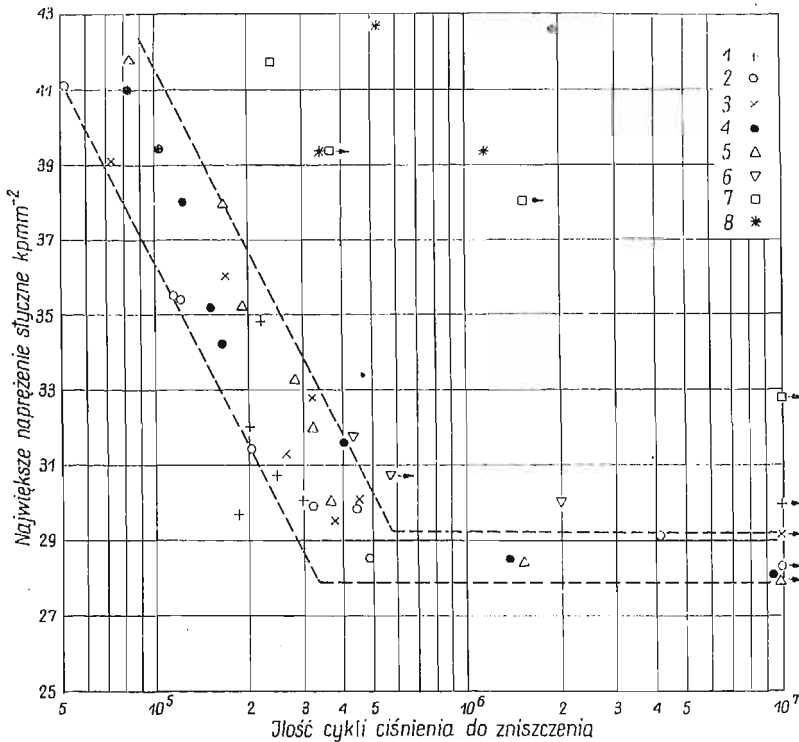
Ciekawą techniką doświadczalną dla otrzymania dwuosiowego stanu naprężenia zastosowali w 1968 r. SCHEWCHUK i in. [17]. Obciążając zmiennym ciśnieniem swobodnie podparte płyty kołowe i płyty eliptyczne o dwu różnych proporcjach wymiarowych, zrealizowano dwuosiowy stan naprężenia o stosunku naprężenia 1:1, 1:0,75, 1:0,5. Otrzymane w ten sposób wyniki doświadczeń przeprowadzonych na próbkach wyciętych z walcowego stopu aluminium 7075-T651 o składzie Zn — 5,5%; Mg — 2,5%; Cu — 1,5%; Cr — 0,3%, były porównywane z kryterium całkowitej energii odkształcenia. Przeprowadzone badania dotyczą niskocyklicznej wytrzymałości zmęczeniowej (do 1000 cykli).

4. Badania na cylindrycznych próbkach grubościennych

Drugą grupę prac doświadczalnych traktujących o zniszczeniu zmęczeniowym w złożonym stanie naprężenia stanowią badania, w których używano próbek o kształcie grubościennego zamkniętego cylindra. W roku 1956 MORRISON i in. [11] opisali aparaturę do

bań w trójosiowym stanie naprężenia, w której wykorzystywano grubościennie próbki rurkowe. Urządzenie to pozwalało na otrzymywanie ciśnienia do 3000 kpcm^{-2} .

W grubościennym zamkniętym cylindrze poddanym wewnętrznemu ciśnieniu panuje trójosiowy stan naprężenia. Ze wzorów Lamègo wynika, że ściskające naprężenie promieniowe i rozciągające obwodowe osiągają największe wartości bezwzględne na wewnętrznej średnicy cylindra. Natomiast naprężenie osiowe jest jednorodne w przekroju próbki. Zarówno w pracy [11], jak i w pracy PARRY'EGO [13], tak określony stan naprężenia traktowano jako superpozycję trójosiowego równomiernego rozciągania i stanu ścinania naprężeniami, które zmieniają się od minimum na zewnętrznej średnicy do maksimum na wewnętrznej średnicy cylindra. Wykorzystując ten sposób podejścia podjęto w pracy [13] próbę doświadczalnego określenia wpływu trójosiowego jednorodnego rozciągania na wytrzymałość



Rys. 3. Krzywa Wohlera dla grubościennych próbek rurkowych [13]. Punkty doświadczalne: próbki wyżarzone po honowaniu 1. $K=D_z/D_w=1,2$; 2. $K=1,4$; 3. $K=1,6$; 4. $K=1,8$; 5. $K=2,0$; 6. $K=3,0$; 7. próbki honowane po wyżarzeniu: $K=1,8$; 8. próbki o powierzchni otworu zabezpieczonej przed działaniem oleju: $K=1,4$

zmęczeniu przy ścinaniu. Stosunek tego trójosiowego równomiernego rozciągania do największego naprężenia ścinającego występującego na wewnętrznej średnicy cylindra jest równy $\frac{\sigma_z}{\tau_{\max}} = \frac{1}{K^2}$, gdzie przez K oznaczono stosunek zewnętrznej do wewnętrznej średnicy cylindra.

Wykorzystując wyżej opisaną aparaturę poddawano pulsacji ciśnienia próbki o średnicy wewnętrznej 15,2 mm i długości pomiarowej 76,2 mm przyjmując sześć różnych proporcji wymiarowych od $K = 1,2$ do $K = 3$. Wykonano je ze stali Vibrac V30 o składzie chemicznym w procentach: C — 0,29; Si — 0,15; Mn — 0,66; Ni — 2,55; Cr — 0,58; Mo — 0,58. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń (rys. 3) wskazują, że granica zmęczenia przy ścinaniu wynosi około $28,5 \text{ kpm}^{-2}$ i jest niezależna od wartości naprężeń rozciągających, które zmieniały się w zakresie od $\sigma_z = 3,28 \text{ kpm}^{-2}$ dla $K = 3$ do wartości $\sigma_z = 20 \text{ kpm}^{-2}$ dla $K = 1, 2$. Zaznaczone przy niektórych punktach strzałki oznaczają, jak to się zwykle przyjmuje, że nie uzyskano zniszczenia, lub że wystąpiło ono poza częścią pomiarową próbki. Tak otrzymana wartość trwałej wytrzymałości zmęczeniowej przy ścinaniu jest dużo mniejsza od wartości $48,8 \text{ kpm}^{-2}$ otrzymanej dla tego samego materiału z próby jednostronnie zmiennego skręcania cienkościennej próbki rurkowej. Traktując otrzymane rezultaty jako wstępne, autor pracy konkluduje, że nałożenie trójosiowego rozciągania ma wpływ na granicę zmęczenia przy ścinaniu, ale jest zdumiewające, że wielkość tych naprężeń rozciągających nie ma istotnego znaczenia. Zamieszczone jednak w dalszej części pracy PARRY'EGO wyniki wskazują, że otrzymane różnice w wytrzymałości zmęczeniowej mogą być powodowane przez niszczące działanie oleju. Przytoczone dotychczas rezultaty (rys. 3) otrzymano na próbkach, które poddawano wyżarzaniu w próżni w temperaturze 600°C po honowaniu wewnętrznej średnicy cylindra. Zupełnie przypadkowo stwierdzono znaczny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej dla próbek, które były honowane po obróbce cieplnej. Wyniki tych doświadczeń dla $K = 1,8$ zaznaczono kwadracikami na rys. 3.

W rezultacie wielu dodatkowych badań autor doszedł do wniosku, że ten wzrost wytrzymałości jest spowodowany przez wytworzenie, na skutek honowania, warstwy ochronnej, która następnie zabezpieczała przed penetracją oleju w mikroszczeliny na powierzchni próbki. Dla potwierdzenia tego wniosku próbowano w inny sposób wytworzyć warstwę ochronną. Malowanie i lakierowanie oraz pokrywanie wewnętrznej powierzchni próbki warstwą kadmu nie dało pozytywnych rezultatów. Dopiero pokrycie powierzchni próbki warstwą gumy dało znaczne podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej. Na rys. 3 zaznaczono otrzymane w ten sposób punkty doświadczalne uzyskane na próbkach o stosunku $K = 1,4$ (gwiazdki). Otrzymane rezultaty są więc potwierdzeniem istotnego wpływu oleju na wytrzymałość zmęczeniową w tego typu doświadczeniach.

Problem wpływu trójosiowego, równomiernego stanu naprężenia na wytrzymałość zmęczeniową, poza omówioną pracą PARRY'EGO [13], był badany również w innych pracach przy prostych stanach obciążenia. CROSSLAND [3] badał efekt ciśnienia hydrostatycznego na wytrzymałość zmęczeniową przy cyklicznym skręcaniu pełnych próbek o średnicy 5,6 mm wykonanych z identycznej stali co próbki użyte w pracy [13]. Przed zasadniczymi badaniami wykonano szereg wstępnych doświadczeń, z których wynikało bez wątpienia, że niezależnie od wielkości ciśnienia cieczy użytej przy badaniach ma ona szkodliwy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową jeśli styka się bezpośrednio z powierzchnią próbki. Dobrym zabezpieczeniem przed tego rodzaju wpływem okazała się cienka warstwa gumy pokrywająca próbkę. Zmęczeniowe próby na skręcanie zrobiono przy dwóch wartościach nałożonego ciśnienia hydrostatycznego, przy 31 kpm^{-2} oraz przy ciśnieniu atmosferycznym. Wyniki doświadczeń (rys. 4) przedstawiono w postaci zależności amplit-

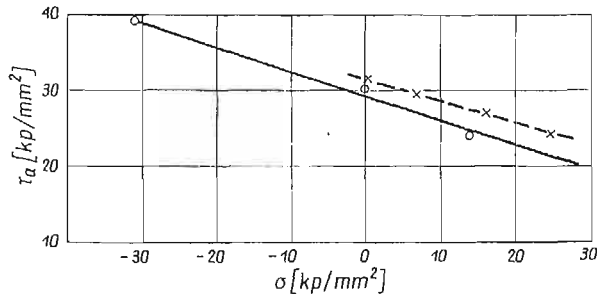
tudy intensywności naprężeń stycznych τ_a w funkcji największej wartości średnich naprężeń normalnych σ . Wielkość τ_a określoną wzorem

$$\tau_a = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a3} - \sigma_{a1})^2}$$

obliczono podstawiając amplitudy poszczególnych składowych naprężeń będących wynikiem przyłożonego zmiennego obciążenia. Natomiast naprężenie średnie określone jest wzorem

$$\sigma = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3},$$

w którym poszczególne składowe są sumą naprężeń wywołanych ciśnieniem hydrostatycznym i przyłożonym cyklicznym obciążeniem. Przeprowadzone doświadczenia wskazują,

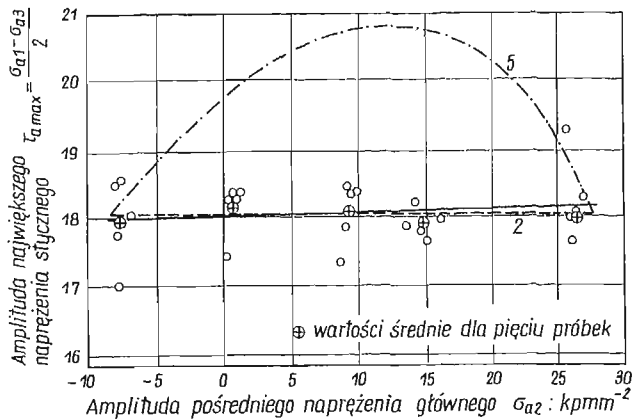


Rys. 4. Zależność amplitudy oktaedrycznego naprężenia stycznego od największej wartości naprężenia normalnego dla stali stopowej. Punkty doświadczalne [3]: ○ — próbki wycięte wzdłuż osi pręta; × — próbki wycięte prostopadłe do osi pręta

że przy wytrzymałości zmęczeniowej istnieje liniowa zależność między tymi dwiema współrzędnymi. Punkty doświadczalne na rys. 4 dla dodatnich wartości naprężeń średnich uzyskano z jednoosiowej próby zmęczeniowej o cyklu rozciąganie — ściskanie, przy której intensywność naprężeń stycznych $\tau_a = \sigma_{a1} \sqrt{3}$, a naprężenie średnie $\sigma = \sigma_1/3$, gdzie przez σ_{a1} oznaczono amplitudę cyklu obciążenia. Zaznaczone dwie linie proste opisujące punkty doświadczalne odnoszą się do próbek o różnej orientacji względem osi pręta, z którego były wycinane. Różnice między tymi punktami doświadczalnymi wskazują i pozwalają ocenić anizotropowe własności badanego materiału. Jak stwierdza autor, wyniki doświadczeń, chociaż zrobione tylko przy kilku wartościach ciśnienia średniego pokazują, że zniszczenie zmęczeniowe w złożonym stanie naprężenia można opisać przez zmodyfikowane kryterium Misesa uwzględniające wpływ średniego naprężenia.

W 1967 roku BLASS i FINDLEY [1] wykorzystując częściowo aparaturę opisaną w pracy [11], wykonali na grubościennych próbkach rurkowych badania mające na celu określenie wpływu pośredniego naprężenia σ_2 (przy $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), na wytrzymałość zmęczeniową w złożonym stanie naprężenia. Próbki wykonano ze stali 4340 o składzie w procentach: C — 0,41; Mn — 0,73; Si — 0,31; Ni — 1,78; Cr — 0,83; Mo — 0,27. Próbki poddawano jednakowym jednostronnie zmiennym cyklom ciśnienia wewnętrznego i siły osiowej.

Zastosowanie różnych głowic przyrządu pozwalało na otrzymanie pięciu różnych maksymalnych wartości naprężenia pośredniego, którym było naprężenie osiowe. Badano po pięć próbek przy każdej z pięciu wartości naprężenia pośredniego. Przy badaniach nie stosowano zabezpieczenia powierzchni próbki przed działaniem oleju. Biorąc pod uwagę fakt, że porównywano wyniki prób wykonanych w jednakowych warunkach sprawa ta nie ma istotnego znaczenia. Wyniki przedstawione na wykresie (rys. 5) w sposób przekonujący pokazują, że dla badanego materiału naprężenie pośrednie nie ma wpływu na wytrzymałość zmęczeniową. Linia ciągłą zaznaczono prostą najlepiej pasującą do punktów



Rys. 5. Wpływ pulsującego pośredniego naprężenia głównego na wytrzymałość zmęczeniową stali stopowej [1]. 2; 5 — linie teoretyczne według rozdziału 2. \circ — punkty doświadczalne dla $1,19 \times 10^5$ cykli. Linia ciągła — prosta wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów w stosunku do punktów doświadczalnych

doświadczalnych, którą obliczono metodą najmniejszych kwadratów. Natomiast liniami przerywanymi zaznaczono reprezentacje kryteriów zniszczenia. Elipsa przedstawia warunek Hubera–Misesa opisany równaniem (2.5), natomiast linia prosta równoległa do osi odciętych przedstawia warunek naprężeń ścinających (2.2). Na osi rzędnych odłożono wartości naprężeń ścinających odpowiadające wytrzymałości zmęczeniowej przy $1,19 \times 10^5$ cykli zmian obciążenia. Ta ilość cykli jest średnią dla 25 badanych próbek. Wyciągnięte z tej pracy wnioski dotyczą tylko badanego materiału i, jak stwierdzają autorzy, nie mają ogólnego charakteru.

5. Badania na cylindrycznych próbkach cienkościennych

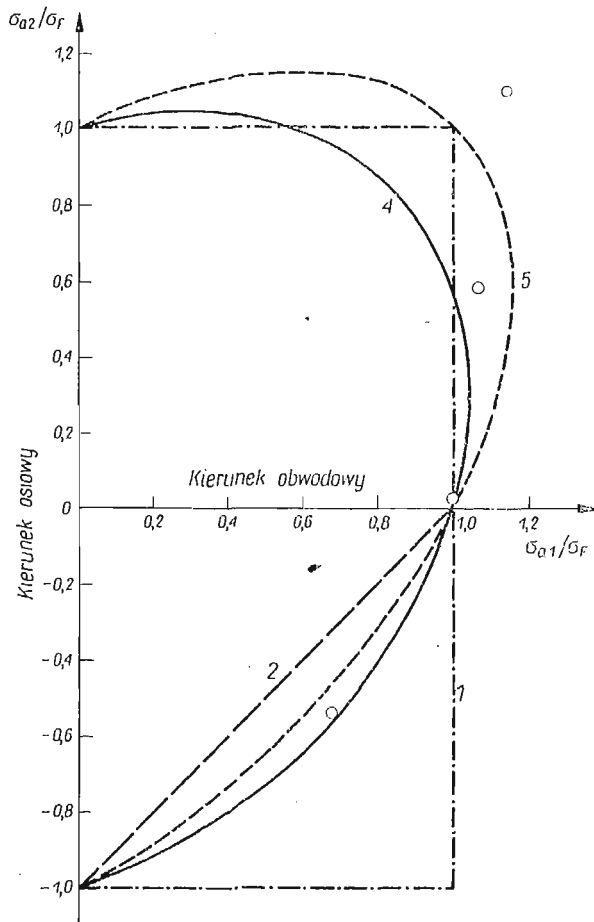
W dziedzinie badań zniszczenia zmęczeniowego w złożonym stanie naprężenia stosunkowo najliczniejszą grupę stanowią prace, w których używano cienkościennych próbek rurkowych obciążonych siłą osiową i ciśnieniem działającym na ścianki. W próbce takiej dla różnych wartości stosunków naprężenia osiowego do obwodowego zachowany jest stały kierunek osi głównych. Stan naprężenia jest w przybliżeniu płaski i jednorodny, przy czym stopień tego przybliżenia jest tym większy, im mniejszy jest stosunek grubości ścianki do wewnętrznej średnicy próbki. Z drugiej strony, ta minimalna grubość ścianki jest ogra-

niczona zarówno względami technologicznymi, jak i możliwością utraty stateczności, jeżeli jedno z naprężeń jest ściskające.

W roku 1934 MAIER (cyt. za [8]) poddawał cienkościennie rurki pulsacji ciśnienia wewnętrznego i statycznej sile osiowej badając jej wpływ na wytrzymałość zmęczeniową w kierunku obwodowym.

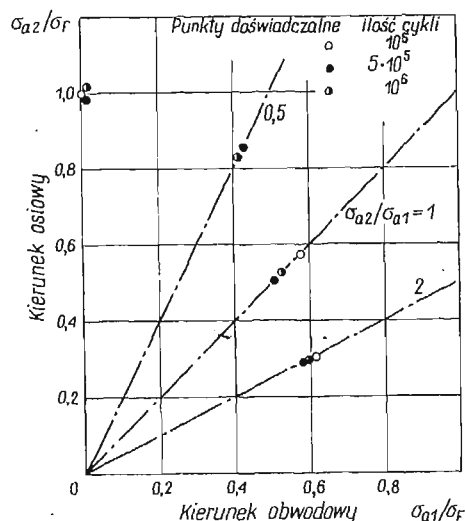
Weryfikacją kryteriów zniszczenia zmęczeniowego zajmowali się w 1945 r. MORIKAWA i GRIFFIS (cyt. za [8]), którzy poddawali próbkę rurkową, przy pomocy dwóch niezależnych układów, pulsacjom siły osiowej i ciśnienia wewnętrznego. Stwierdzili oni, że kryterium maksymalnych naprężeń dobrze zgadza się z wynikami ich doświadczeń po wprowadzeniu poprawek uwzględniających anizotropowe własności materiału.

Niewątpliwym postępowaniem w badaniach zmęczeniowych próbek rurkowych była opublikowana w 1949 r. praca MAJORSA, MILLSA i MACGREGORA [8]. Pulsacje ciśnienia wewnętrznego i siły osiowej były wywoływane przez jedną tylko pompę olejową. Złożony stan na-



Rys. 6. Porównanie kryteriów wytrzymałości zmęczeniowej z wynikami doświadczeń [8] dla miękkiej stali ($C = 0,2\%$) przy cyklu pulsującym dla 10^7 zmian obciążenia. 1; 2; 4; 5 — linie teoretyczne według rozdziału 2

prężenia był natomiast realizowany za pomocą oryginalnych w pomysłach głowic obciążających, które pozwoliły uzyskać różne proporcje między naprężeniem obwodowym i osiowym. Dla każdej z czterech różnych proporcji naprężeń badano po osiem próbek przy różnych poziomach obciążenia. Próbkę wykonano z wyżarzonej stali 1020 o zawartości 0,2% węgla i 0,55% manganu. Wartości wytrzymałości zmęczeniowej przy 10^7 cykli zmian obciążenia przedstawiono w bezwymiarowych współrzędnych na płaszczyźnie naprężeń głównych (rys. 6). Wartości te odniesiono do wytrzymałości zmęczeniowej próbki poddanej pulsacji ciśnienia wewnętrznego przy zerowej sile osiowej. Na nieregularność otrzymanych wyników niewątpliwie ma wpływ zarówno zauważona anizotropia własności materiału, jak i niszczące działanie oleju, które nie było uwzględniane w przeprowadzonych badaniach. Autorzy wnioskują, że mimo pewnej nieregularności punkty doświadczalne najlepiej pasują do hipotezy odkształcenia postaciowego (2.5).



Rys. 7. Wytrzymałość zmęczeniowa przy cyklu pulsującym w złożonym stanie naprężenia dla stopu aluminium Alcoa 24S-T [9]

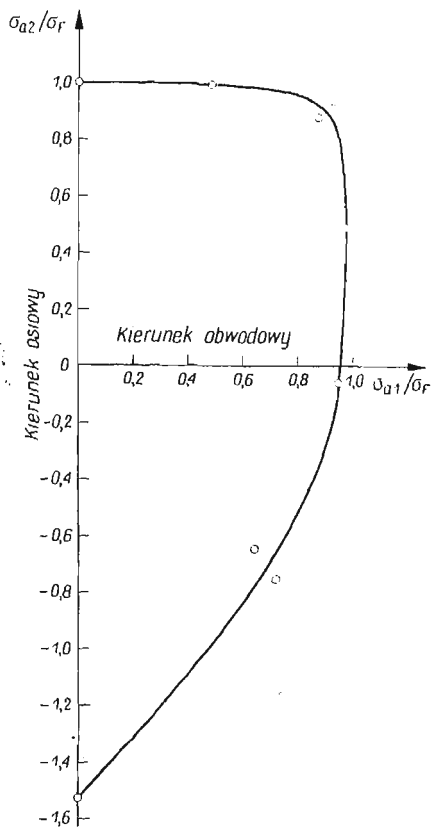
W 1949 r. MARIN [9] opisał aparaturę i otrzymane wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej cienkościennych próbek przy czterech różnych proporcjach naprężeń głównych.

Próbki wykonane z ciągniętej rury ze stopu aluminium Alcoa 24S-T o składzie: Cu — 4,4%, Mg — 1,5%, Mn — 0,6% poddawano niesymetrycznym cyklom obciążenia utrzymując stosunek minimalnych do maksymalnych naprężeń w granicach od 0,1 do 0,2. Dla każdej z czterech proporcji naprężeń obwodowego do osiowego, zawartych w granicach od 2 do 0, badano po osiem próbek.

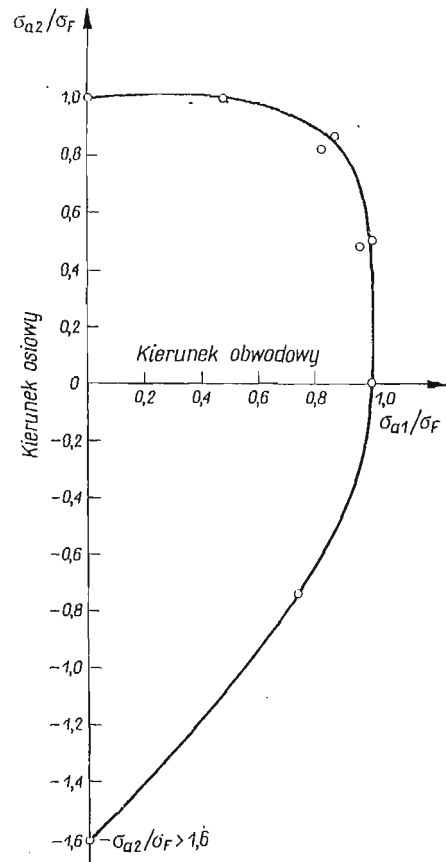
Otrzymane wyniki przedstawiono na płaszczyźnie naprężeń głównych (rys. 7) odniesione do wartości wytrzymałości zmęczeniowej przy osiowym rozciąganiu. Poszczególne punkty zaznaczone dla każdej proporcji naprężeń odpowiadają wytrzymałości zmęczeniowej przy różnych ilościach cykli 10^5 ; 5×10^5 i 10^6 . Wytrzymałość zmęczeniowa w kierunku obwodowym wynosi około 60% wytrzymałości w kierunku osiowym chociaż, jak

zaznaczają autorzy, statyczna wytrzymałość w kierunku obwodowym wynosi dla tego samego materiału około 80% wytrzymałości w kierunku osiowym. Otrzymane rezultaty budzą jednak duże wątpliwości. Powierzchnia próbki była w stanie nieobrobionym i nie zabezpieczono jej przed działaniem oleju. W przeciwieństwie do poprzednio omówionej pracy nie wszystkie próbki były obciążane w jednakowych warunkach. Wartości wytrzymałości σ_F otrzymano z próby jednoosiowego rozciągania, przy której nie było oleju wewnątrz próbki.

W opublikowanej w roku 1950 obszernej pracy ROŠA i EICHINGERA [14] dotyczącej zniszczenia, poświęcono dużo miejsca problemowi wytrzymałości zmęczeniowej w złożonym stanie naprężenia. Doświadczenia przeprowadzono przy siedmiu różnych pro-



Rys. 8. Wytrzymałość zmęczeniowa staliwa w złożonym stanie naprężenia przy cyklu pulsującym dla 10^6 cykli [14]



Rys. 9. Wytrzymałość zmęczeniowa stopu aluminium Avional D w złożonym stanie naprężenia przy cyklu pulsującym dla 10^6 cykli [14]

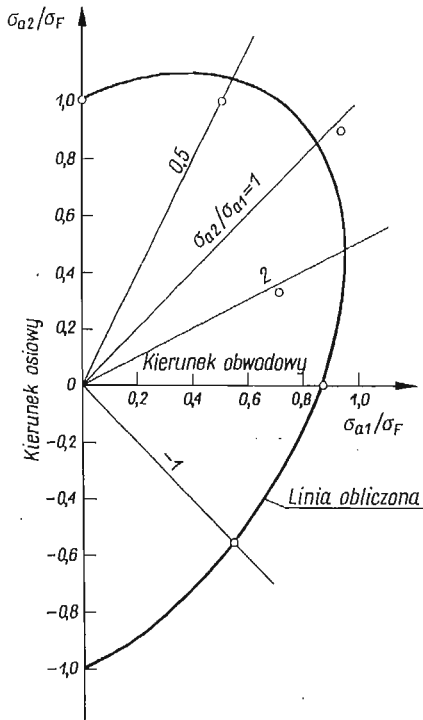
porcjach między naprężeniem obwodowym i osiowym, w tym również przy jednoosiowym rozciąganiu i ściskaniu. Badania wykonano dla siedmiu różnych materiałów stosując niesymetryczny cykl obciążenia. Dość duży stosunek grubości ścianki do średnicy wewnętrznej zabezpieczał wprawdzie próbkę przed utratą stateczności przy jednoosiowym ściskaniu,

ale jednocześnie powodował niejednorodny rozkład naprężeń w przekroju próbki i względnie duże wartości ściskających naprężeń promieniowych. Wartości te, liczone jako średnie między wielkością naprężenia promieniowego na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni próbki, nie przekraczają 11% większego z pozostałych naprężeń głównych. Na rys. 8 przedstawiono wyniki badań na próbkach wykonanych ze staliwa. Punkty doświadczalne i opisująca je linia ciągła dotyczą wytrzymałości zmęczeniowej przy 10^6 cykli zmian obciążenia. Wartość tej wytrzymałości przy jednoosiowym ściskaniu próbki jest około 1,5 raza większa niż to wynika z próby jednoosiowego rozciągania, przy czym był to jedyny wypadek uzyskania zniszczenia przy ściskaniu. W pozostałych wypadkach, jak na rys. 9, na którym przedstawiono wyniki badań dla stopu aluminium Avional D, wobec nie uzyskania zniszczenia określono jedynie, że wytrzymałość zmęczeniowa jest większa od pewnej wielkości naprężeń. Dla materiałów ciągliwych, podana wartość wytrzymałości przy ściskaniu była około 1,5 raza większa od wytrzymałości przy rozciąganiu. Natomiast dla materiałów kruchych (próbki wycięte ze spoin, żeliwo) wielkość przy ściskaniu była około 2 razy większa od analogicznej wielkości z próby jednoosiowego zmiennego rozciągania. Na podstawie przeprowadzonych badań autorzy stwierdzają, że przy zniszczeniu zmęczeniowym materiał podlega w przybliżeniu hipotezie Coulomba–Mohra.

BUNDY i MARIN [2] w roku 1954 przedstawili badania przeprowadzone na próbkach rurkowych ze stopu aluminium 14S-T4 (o składzie Cu — 4,4%, Si — 0,8%, Mn — 0,8%, Mg — 0,4%). Doświadczenia przeprowadzono w dwóch ćwiartkach płaszczyzny naprężeń głównych przy sześciu różnych proporcjach między pulsującym synchronicznie naprężeniem obwodowym i osiowym. Rozkład naprężeń traktowano jako jednorodny w przekroju próbki zaznaczając, że największe odchylenie od średniego naprężenia obwodowego, jak to wynika ze wzoru Lamégo, wynosi około 5%. Wyniki doświadczeń przedstawione na rys. 10 odpowiadają wytrzymałości zmęczeniowej przy 10^6 cykli. Wielkości te odniesiono do wytrzymałości zmęczeniowej przy jednoosiowym rozciąganiu. Autorzy podkreślają, że anizotropowe własności materiału są bardziej widoczne przy obciążeniu cyklicznym niż statycznym. Procentowa różnica w wytrzymałości zmęczeniowej w kierunku obwodowym i osiowym jest rzędu 15%, chociaż różnica przy obciążeniu statycznym była znacznie mniejsza. Dla opisanego otrzymanych wyników doświadczalnych, autorzy proponują modyfikację kryterium energii odkształcenia postaciowego przez wprowadzenie dwóch dodatkowych stałych uwzględniających anizotropię. Obliczoną w ten sposób krzywą zaznaczono linią ciągłą na rys. 10. Wprawdzie dane doświadczalne są niewystarczające i występuje nieregularność otrzymanych wyników, przy czym szczególnie odbiega punkt dla stosunku $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} = 2$, to jednak jak stwierdzają autorzy widoczna jest ogólna zgodność wyników eksperymentalnych z krzywą otrzymaną teoretycznie. Być może jednym z czynników wpływających na tak duży rozrzut wyników doświadczalnych jest wpływ oleju na wytrzymałość zmęczeniową, na który w omawianej pracy nie zwracano uwagi. Należy tu podkreślić, że nie posiadając danych doświadczalnych autorzy przyjęli wytrzymałość zmęczeniową przy prostym ściskaniu taką samą jak przy prostym rozciąganiu. Jest to założenie mało wiarygodne szczególnie w konfrontacji z pracą NEWMARKA i in. [12] z 1951 r., która poświęcona była wytrzymałości zmęczeniowej przy jednoosiowym ściskaniu. Z przeprowadzonych bardzo starannie doświadczeń dla wszystkich badanych materiałów (żeliwo szare, stop aluminium, miękka stal) otrzymano znacznie wyższą wartość wytrzymałości

zmęczeniowej przy zmiennej od zera do określonej wartości sile ściskającej niż w przypadku pulsacji siły rozciągającej. Autorzy stwierdzają, że zbyt niskie wartości wytrzymałości zmęczeniowej przy ściskaniu podawane w innych pracach są rezultatem bądź to koncentracji naprężeń, bądź naprężeń szczątkowych czy wreszcie niezbyt starannego przeprowadzenia doświadczeń.

Zjawisko zniszczenia zmęczeniowego przy ściskaniu badał w 1969 r. HUBBARD [6]. Doświadczenia przeprowadzono na płaskich próbkach z karbem wykonanych ze stopu aluminium 7075-T6, na powierzchni których nałożono warstwę materiału czułego elastooptycznie. Obserwując rozprzestrzenianie się szczeliny i rozkład naprężeń w jej otoczeniu



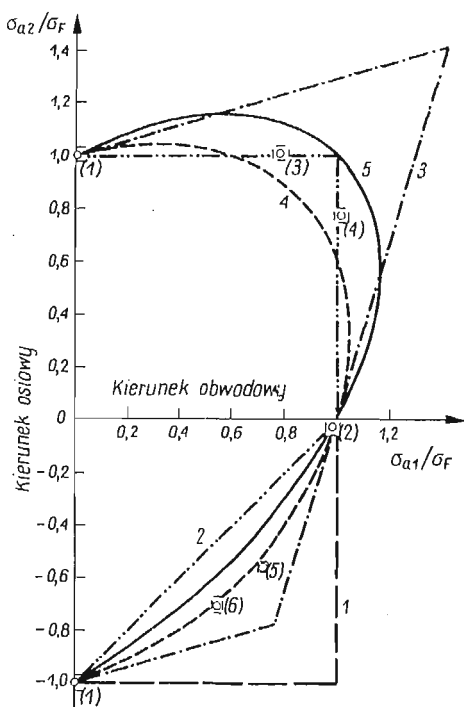
Rys. 10. Wytrzymałość zmęczeniowa stopu aluminium 14S-T4 w złożonym stanie naprężenia przy cyklu pulsacyjnym dla 10^6 cykli. [2]. Linia teoretyczna — elipsa Hubbera-Misesa z uwzględnieniem anizotropii

podczas jednostronnego cyklu zmiany obciążenia ściskającego autor wnioskuje, że za zniszczenie ściskanej próbki odpowiedzialne są rozciągające naprężenia szczątkowe występujące przy odciążaniu w pobliżu szczeliny. Stwierdzono również, że dla danej długości szczeliny i maksymalnej wartości naprężenia ściskającego można tak dobrać wartość minimalnego naprężenia ściskającego w cyklu, że zostanie zatrzymany proces wzrostu szczeliny.

W opublikowanej w 1970 r. pracy ROTVELA [15] opisano sposób przeprowadzenia doświadczeń i wyniki badań zmęczeniowych w dwuosiowym stanie naprężenia.

Próbki ze stali węglowej o zawartości 0,35% — C, 0,20% — Si, 0,45% — Mn, wykonano bardzo starannie w 10 klasie gładkości powierzchni. Dla zabezpieczenia przed niszczącym działaniem oleju powierzchnie próbek pokrywano cienką warstwą plastyku. Próbki były obciążane symetrycznym cyklem siły osiowej i ciśnienia działającego na ścianki.

Przy obliczaniu naprężeń uwzględniano ich nierównomierny rozkład spowodowany zbyt dużą grubością ścianki w stosunku do średnicy wewnętrznej, jak i występujący momentem gnącym wywołanym przez nieosiowe zamocowania próbki. Doświadczenia przeprowadzono dla sześciu różnych proporcji między naprężeniami głównymi, badając w każdej serii minimum sześć próbek. Wytrzymałość zmęczeniową określano przy $2,5 \times 10^6$ cykli zmian obciążenia. Na wykresie rys. 11 odłożono punkty doświadczalne we współrzędnych bezwymiarowych odnosząc je do wartości wytrzymałości przy cyklu rozciągania-



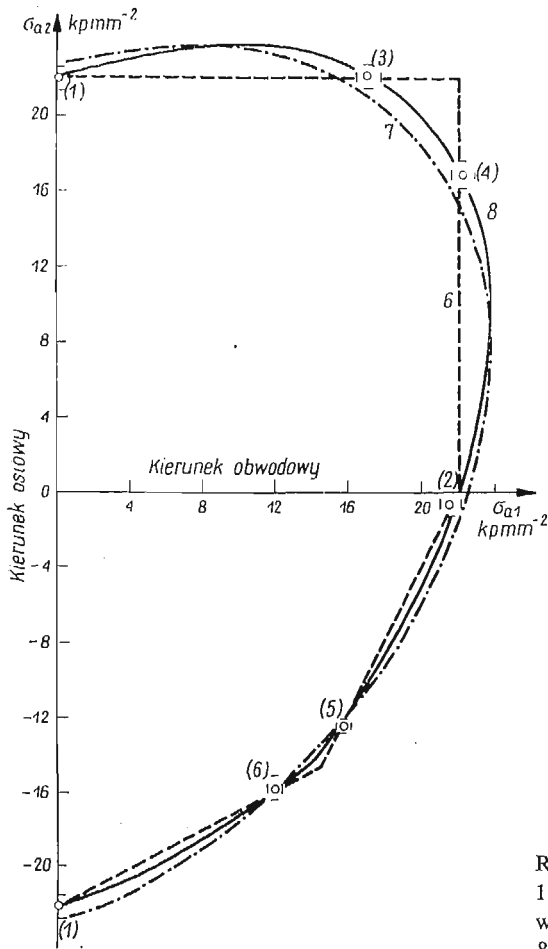
Rys. 11. Porównanie kryteriów wytrzymałości zmęczeniowej z wynikami doświadczeń dla stali węglowej ($C = 0,35\%$) przy cyklu symetrycznym dla $2,5 \times 10^6$ cykli [15]. 1; 2; 3; 4; 5 — linie teoretyczne według rozdziału 2

ściskanie wzdłuż osi próbki. Poziome i pionowe linie przy każdym punkcie oznaczają zakres błędu. Na rysunku tym zaznaczono również opisane poprzednio kryteria zniszczenia zmęczeniowego zawierające jedną stałą materiałową.

Te same punkty doświadczalne porównano również z trzema kryteriami o dwóch stałych materiałowych, które dobrano w ten sposób, żeby krzywa opisywała możliwie najlepiej punkty doświadczalne (rys. 12). Otrzymane wyniki dobrze zgadzają się zarówno z zaproponowanym przez Crosslanda kryterium naprężeń oktaedrycznych opisanym równaniem (2.8), jak i kryterium Coulomba-Mohra (2.6). Stwierdzenie, które z nich lepiej opisuje zniszczenie zmęczeniowe w złożonym stanie naprężenia wymaga przeprowadzenia dodatkowych doświadczeń przy takich proporcjach między naprężeniami, przy których różnice między obydwooma kryteriami są największe.

Tylko dwie z omówionych tu prac były przeprowadzone przy symetrycznych cyklach obustronnie zmiennych, mianowicie praca SAWERTA [16] i ROTVELA [15]. Wszystkie pozostałe prace wykonano przy cyklu niesymetrycznym (pulsującym), w którym naprężenia

zmieniały się od wartości zerowej (lub bliskiej zeru) do uprzednio ustalonej pewnej wartości, dodatniej lub ujemnej, w zależności od wymaganej proporcji między naprężeniami. Jak słusznie zauważono [15] doświadczenia takie są zaburzone wpływem średniego naprężenia cyklu na wytrzymałość zmęczeniową. Tylko przy cyklach symetrycznych obu-



Rys. 12. Porównanie wyników doświadczeń z rys. 11 z kryteriami wytrzymałości zmęczeniowej zawierającymi dwie stałe materiałowe [15]. 6; 7; 8 — linie teoretyczne według rozdziału 2

stronnie zmiennych, dla każdej proporcji między naprężeniami pozostaje stała, równa zero wartość średniego naprężenia. Natomiast przy cyklu jednostronnym zmiana amplitudy powoduje zmianę naprężenia średniego, które wobec tego ma różne wartości, zarówno dla poszczególnych naprężeń głównych przy danym stosunku między nimi, jak i dla różnych proporcji między naprężeniami.

6. Wnioski

Rozwój doświadczalnych badań zmęczeniowych w złożonym stanie naprężenia postępował w sposób wolny. Trudna technika doświadczalna i duża pracochłonność badań odgrywały w sposób istotny rolę czynnika hamującego. Poza tym wyniki prac wykona-

nych w różnych warunkach nie stanowią porównywalnego materiału. Większość badań eksperymentalnych przeprowadzono przy niesymetrycznym cyklu obciążenia, przy którym wyniki zaburzone są wpływem średniego naprężenia w cyklu na wytrzymałość zmęczeniową. Natomiast tylko dwie prace [15] i [16] wykonano przy obustronnie zmiennym cyklu zmiany obciążenia, a więc w warunkach, w których rzeczywiście jesteśmy w stanie określić zmęczeniowe cechy badanego materiału.

Wart podkreślenia jest również zauważony w wielu pracach doświadczalnych fakt wystąpienia silniejszej anizotropii przy cyklicznym obciążaniu, niż w warunkach statycznego obciążenia próbki.

Mimo że fenomenologiczny opis zniszczenia zmęczeniowego metali w złożonym stanie naprężenia pozostaje nadal niekompletny i nie udokumentowany doświadczalnie to jednak wyniki badań pozwalają już na wyciągnięcie pewnych ogólnych wniosków. Warunek zniszczenia zmęczeniowego w swej ogólnej postaci powinien uwzględniać wpływ pierwszego niezmiennika. W sposób przekonujący wykazał to CROSSLAND [3] dla stali stopowej. Wykonane przez niego stosunkowo proste doświadczenia były podstawą matematycznej formy warunku zniszczenia zmęczeniowego (2.8), który uwzględnia podstawowe efekty zauważone przy doświadczeniach przeprowadzonych przez innych autorów. Zaproponowany przez CROSSLANDA warunek przedstawia w przestrzeni naprężeń głównych stożek o osi równo nachylonej do osi współrzędnych układu. Wierzchołek stożka znajduje się po stronie naprężeń rozciągających. Do opisu zniszczenia klasy materiałów, których wytrzymałość zmęczeniowa w złożonym stanie nie zależy od wielkości pośredniego naprężenia, może być wykorzystany warunek Coulomba. Zdaniem autorów niniejszej pracy właśnie te dwa warunki zniszczenia zmęczeniowego, warunek Crosslanda i Coulomba, mogą być zalecane do analizy własności zmęczeniowych metali w złożonym stanie naprężenia.

Literatura cytowana w tekście

1. J. J. BLASS, W. N. FINDLEY, *The influence of the intermediate principal stress on fatigue under triaxial stresses*, Material Research and Standards, 7, 6, 1967, 254-261.
2. R. W. BUNDY, J. MARIN, *Fatigue strength of 14S-T4 aluminium alloy subjected to biaxial stresses*, Proc. ASTM, 54, 1954, 755-768.
3. B. CROSSLAND, *Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel*, Int. Conf. on Fatigue of Metals, London, 1956, 138-149.
4. W. N. FINDLEY, P. N. MATHUR, E. SZCZEPANSKY, A. O. TEMEL, *Energy versus stress theories for combined stress — a fatigue experiment using a rotating disk*, Trans. ASME, D, 83, 1, 1961, 10-14.
5. W. N. FINDLEY, P. N. MATHUR, *Modified theories of fatigue failure under combined stress*, Proc. SESA, XIV, 1, 1956, 35-46.
6. R. P. HUBBARD, *Crack growth under cyclic compression*, Trans. ASME, D, 91, 4, 1969, 625-631.
7. LIEBOWITZ (editor), *Fracture*, 2, Mathematical Fundamentals, Academic Press, New York and London 1968.
8. H. MAJORS, B. D. MILLS, C. W. MACGREGOR, *Fatigue under combined pulsating stresses*, J. Appl. Mech., 16, 3, 1949, 269-276.
9. J. MARIN, *Biaxial tension-tension fatigue strengths of metals*, J. Appl. Mech., 16, 4, 1949, 383-388.
10. J. MARIN, *Interpretation of fatigue strengths for combined stresses*, Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals, London, 1956, 184-194.
11. J. L. M. MORRISON, B. CROSSLAND, J. S. C. PARRY, *Fatigue under triaxial stress: development of a testing machine and preliminary results*, Proc. Inst. Mech. Engr., 21, 170, 1956, 697-712.

12. N. M. NEWMARK, R. J. MOSBORG, W. H. MUNSE, R. E. ELLING, *Fatigue tests in axial compression*, Proc. ASTM, **51**, 1951, 792-803.
13. J. S. C. PARRY, *Further results of fatigue under triaxial stress*, Int. Conf. on Fatigue of Metals, London 1956, 132-137.
14. M. ROŠ, A. EICHINGER, *Die Bruchgefahr fester Körper bei wiederholter Beanspruchung — Ermüdung*, EMPA — Bericht, 173, Zürich 1950.
15. F. ROTVEL, *Biaxial fatigue tests with zero mean stresses using tubular specimens*, Int. J. Mech. Sci., **12**, 7, 1970, 597-613.
16. W. SAWERT, *Verhalten der Baustähle bei wechselnder mehrachsiger Beanspruchung*, Z. Ver. Deut. Ing., **87**, 39/40, 1943, 609-615.
17. J. SCHEWCHUK, S. Y. ZAMRIK, J. MARIN, *Low-cycle fatigue of 7075-T651 aluminium alloy in biaxial bending*, Exp. Mech., **8**, 11, 1968, 504-512.
18. T. YOKOBORI, T. YOSHIMURA, *A criterion for fatigue fracture under multi-axial alternating stress state*, Rep. of the Res. Inst. for Strength and Fracture of Materials, Tohoku University, Sendai, Japan, **2**, 2, 1966, 45-54.
19. И. Н. ШКАНОВ, *Экспериментальная проверка критериев усталостной прочности при двухосном растяжении*, Проблемы Прочности, **2**, 1970, 8-10.

Р е з ю м е

ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЛОЖНОМ
НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Дается обзор экспериментальных работ по исследованию усталостной прочности при сложном напряженном состоянии. Работы группируются соответственно форме образцов: образцы сложной формы, трубчатые толстостенные образцы, трубчатые тонкостенные образцы. Внутри каждой группы работы описаны в хронологическом порядке. Кратко изложены критерии усталостной прочности для сложного напряженного состояния, которые сравнены с данными эксперимента.

S u m m a r y

INVESTIGATIONS OF FATIGUE UNDER COMBINED STRESSES

In this article the review of the original research is given in which are described the experimental investigations of fatigue fracture under combined stresses. The papers have been ordered according to shape of the specimens: complex shape specimens, thick-walled specimens, thin-walled specimens. Each group of papers is presented in the chronological order. Equations of the fatigue conditions mentioned in papers are given.

INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 8 lutego 1971 r.